

複合構造レポート 20

FRP 複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告

目次

第 1 部 FRP の部材・材料の力学特性および接合方法の評価

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	FRP 部材・材料強度の評価	5
2.1	FRP 構造物の設計の考え方	5
2.2	各作用に対する部材・材料の強度評価に関する検討事例	6
2.2.1	引張強度	6
2.2.2	圧縮強度	6
2.2.3	曲げ強度	9
2.2.4	せん断強度	9
2.3	FRP の材料試験結果によるばらつきの評価と分析	10
2.3.1	材料特性と材料係数	10
2.3.2	FRP 検査路の引抜成形材	10
2.3.3	FRP 水門	15
2.4	まとめ	17
第 3 章	FRP 部材のボルト締付トルクに関する調査検討	19
3.1	概要	19
3.2	ボルト締付のトルクの実績調査と課題	19
3.2.1	実績調査の概要	19
3.2.2	締付トルクの算定方法	20
3.2.3	実績調査における現状把握と課題	20
3.3	ボルト締め付けに関する試験施工と締め付け力の評価に関する検討	21
3.3.1	検討の目的と対象	21
3.3.2	実験方法と FRP 材料	21
3.3.3	実験結果と考察	24
3.4	適切なボルト締め付け力に関する提言	28
第 4 章	高力ボルト摩擦接合継手に関するデータの蓄積と分析	31
4.1	概要	31
4.2	高力ボルト接合（摩擦）のすべり耐力の評価	34
4.2.1	高力ボルト接合（摩擦）のすべり耐力の評価	34
4.2.2	高力ボルト接合のすべり係数の推奨値	35
4.3	ボルト軸力のリラクセーション特性と長期予測	37
4.3.1	リラクセーションに関する研究事例	37
4.3.2	リラクセーションによる軸力の低減	45
4.4	高力ボルト接合の適用に向けた今後の課題	46

第5章 土木用接着剤の分類と評価	49
5.1 土木用接着剤の種類	49
5.1.1 FRP の接着接合用の材料への要求性能	49
5.1.2 対象とする土木用接着剤	49
5.2 エポキシ樹脂系接着剤の物性と評価事例	50
5.2.1 エポキシ樹脂系接着剤の概要	50
5.2.2 エポキシ樹脂系接着剤の評価事例	50
5.3 アクリル樹脂系接着剤の物性と評価事例	52
5.3.1 アクリル樹脂系接着剤の概要	52
5.3.2 他分野でのアクリル樹脂系接着剤の利用例	52
5.3.3 アクリル樹脂系接着剤の評価事例	53
5.4 ポリウレア系接着剤の物性と評価事例	56
5.4.1 ポリウレア系接着剤の概要	56
5.4.2 ポリウレアの接着接合部の強度評価事例	56
5.4.3 ポリウレアとの補強効果と温度依存性評価事例	59
5.5 土木用接着剤の適用範囲と留意点	61
第6章 接着特性の評価手法の検討	63
6.1 概要	63
6.2 国内外での評価指標や検討事例	63
6.2.1 国内での接着性や耐久性に関する試験方法および指標	63
6.2.2 国外での接着性や耐久性の評価指標	64
6.2.3 産業分野での耐久性試験や評価指標例	67
6.2.4 まとめ	68
6.3 各接着剤の接着接合部の比較	68
6.3.1 実験方法・パラメータ	68
6.3.2 試験片と材料特性	69
6.3.3 実験結果と考察	70
6.3.4 まとめ	74
6.4 付着力の評価	75
6.4.1 簡易的付着力評価法の検討の背景	75
6.4.2 簡易試験法の検討	75
6.4.3 接着剤の垂直応力評価	78
6.4.4 試験	80
6.4.5 まとめ	82
6.5 付着試験方法の検討 ³⁾	82
6.5.1 実験概要 ¹²⁾	82
6.5.2 評価方法	82
6.5.3 実験結果	83
6.5.4 まとめ	83
6.6 まとめ	85
第7章 接着接合部のクリープ特性の評価	87
7.1 概要	87
7.2 試験体	87

7.3	試験装置の概要	87
7.4	クリープ試験	88
7.5	クリープコンプライアンスの定義	88
7.6	ひずみ挙動	90
7.7	クリープコンプライアンスの評価	91
7.8	まとめ	93
第8章	接着接合部の疲労耐久性の評価	95
8.1	概要	95
8.2	接着接合部の曲げ作用による疲労耐久性の評価	95
8.2.1	接着接合部の評価方法と試験片の設計	95
8.2.2	静的試験によるはく離荷重の検討	97
8.2.3	疲労試験による耐久性の検討	98
8.3	作用力，接着剤の種類による疲労耐久性の評価	102
8.4	まとめ	102
第9章	CFRPにより接着補強した鋼材の長期耐久性の評価	105
9.1	概要	105
9.2	FRP補強鋼板の耐久性	105
9.2.1	実験方法	105
9.2.2	実験結果	107
9.3	補強に用いたFRPの耐久性	111
9.3.1	実験方法	111
9.3.2	実験結果	111
9.4	接合部の長期耐久性に関するまとめ	113
第2部 FRP複合構造の設計に関する研究調査と試設計		
第1章	はじめに	115
第2章	FRP歩道橋の計画・設計に関するデータ	117
2.1	はじめに	117
2.2	FRP歩道橋事例一覧	117
2.3	FRP歩道橋材料特性事例	121
2.3.1	材料および成形種類について	121
2.3.2	材料特性	121
2.4	FRP歩道橋構造諸元事例	124
2.4.1	橋梁形式	124
2.4.2	適用支間長	125
2.4.3	桁高支間比	127
2.4.4	部材質量	129
2.5	FRP歩道橋工事費事例	131
2.6	FRP歩道橋の架設事例	132
2.6.1	ユニット架設事例（トラッククレーン一括架設）	132
2.6.2	現場組立架設事例	136

2.7	まとめ	139
第3章	FRP 形材に関する一覧	141
3.1	はじめに	141
3.2	FRP 形材の断面寸法および断面諸量	141
3.2.1	引抜成形 FRP 形材の断面寸法および断面性能	141
3.2.2	FRP 床版および検査路に用いられる形材の形状	152
3.2.3	FRP 水門および関連設備用部材	153
3.2.4	歩道橋・遊歩道などの構造物に用いられる引抜材	155
3.3	標準断面寸法外の FRP 部材による水門扉設計・施工事例	158
3.4	まとめ	158
第4章	FRP 材料を新たな構造物に適用する試み	159
4.1	はじめに	159
4.2	FRP 鉄道橋	159
4.2.1	構造概要	159
4.2.2	鋼鉄道橋と FRP 鉄道橋の比較	160
4.2.3	FRP 鉄道橋の試設計	164
4.2.4	まとめ	170
4.3	災害復旧用 PFC・FRP 複合構造部材	171
4.3.1	概要	171
4.3.2	検討内容	171
4.3.3	耐荷特性	173
4.3.4	重量比性能	175
第5章	最近の新しい FRP 構造物の事例	177
5.1	はじめに	177
5.2	防衛装備庁 CFRP 応急橋梁	178
5.2.1	構造物の概要	178
5.2.2	構造諸元と使用材料	180
5.2.3	設計, 製作, 施工	181
5.2.4	構造物の特長	184
5.3	FRP 歩道拡幅床版	184
5.3.1	構造物の概要	184
5.3.2	使用材料	187
5.3.3	施工の概要	188
5.4	塩害地域遊歩道, デッキ, 側道橋, 歩道, 避難階段 (対津波, 斜面用)	189
5.4.1	構造物の概要	189
5.4.2	構造諸元と使用材料	189
5.4.3	設計・製作・施工	190
5.4.4	構造物の特徴	197
5.5	橋梁検査路	201
5.5.1	構造物の概要	201
5.5.2	桁形式 FRP 検査路	202
5.5.3	トラス桁形式 FRP 検査路	204

5.6	歩道橋（玄若橋）	206
5.6.1	構造物の概要	206
5.6.2	構造諸元と使用材料	207
5.6.3	設計，製作，施工	208
5.6.4	構造物の特徴	210
5.7	まとめ	210
第6章	FRP 部材の解析事例	213
6.1	はじめに	213
6.2	解析事例	213
6.3	まとめ	249
第7章	FRP の接合事例	251
7.1	はじめに	251
7.2	材種組み合わせと接合方式の整理	251
7.2.1	小径の金属接合部品の挿入による接合	251
7.2.2	CFRP・GFRP と鋼との高力ボルト摩擦接合	253
7.2.3	ボルト支圧接合における性能向上	255
7.2.4	接着接合における低弾性接着層の利用	257
7.2.5	成形・接着同時施工による接着接合	258
7.2.6	機械接合と接着接合の併用	259
7.3	まとめ	260
第3部	FRP 構造物の維持管理方法に関する調査研究	
第1章	はじめに	263
第2章	FRP の劣化・損傷	265
2.1	劣化・損傷の種類と劣化のメカニズム	265
2.1.1	FRP の基本構造	265
2.1.2	FRP 構造物の劣化・損傷	266
2.2	FRP 構造物の劣化・損傷事例	271
2.2.1	劣化評価の主な考え方	271
2.2.2	実構造物および試験体における劣化・損傷の事例	271
2.3	劣化した FRP の機械的特性の変化の事例	284
2.3.1	長期暴露された GFRP 引抜成形材	284
2.3.2	材料試験による検討	303
2.4	花火の熱による実験的損傷事例	310
2.4.1	実験概要	310
2.4.2	実験方法	310
2.4.3	試験体と燃焼材	311
2.4.4	実験結果	312
2.4.5	まとめ	315

第3章 FRP 構造物の点検および性能評価方法	317
3.1 FRP 構造物の点検.....	317
3.1.1 事前準備.....	317
3.1.2 FRP 特有の点検項目.....	318
3.1.3 点検で留意すべき事項.....	318
3.2 点検調書案.....	319
3.2.1 点検調書フォーマット作成時の基本的考え方.....	319
3.2.2 点検調書案.....	320
3.3 外観変状に基づく FRP 構造物の性能評価手法.....	323
3.3.1 複合構造標準示方書での外観変状に基づく評価手法.....	323
3.3.2 外観変状に基づくグレーディングの事例.....	327
3.3.3 構造性能のグレーディング.....	328
3.3.4 他分野における評価手法.....	330
第4章 FRP の非破壊評価事例	337
4.1 FRP の非破壊検査.....	337
4.1.1 超音波探傷法.....	337
4.1.2 放射線法.....	337
4.1.3 AE 法.....	338
4.1.4 赤外線サーモグラフィ法.....	338
4.1.5 渦流探傷法.....	338
4.1.6 その他の方法.....	338
4.2 透水試験による表面保護層の劣化評価.....	339
4.2.1 概要.....	339
4.2.2 FRP 保護塗装に対する透水試験法適用事例.....	339
4.3 超音波探傷試験による FRP の V_f 評価の可能性.....	340
4.3.1 対象材料および試験方法.....	340
4.3.2 繊維体積含有率の算出方法.....	341
4.3.3 試験結果.....	344
4.4 打音による暴露した GFRP 角パイプの劣化評価の試み.....	346
4.4.1 計測方法.....	346
4.4.2 計測結果.....	347
4.4.3 重心周波数と弾性係数との比較.....	349
4.4.4 まとめ.....	349
第5章 劣化した FRP 部材の補修事例	353
5.1 補修方法に関する概説.....	353
5.2 表面が劣化した FRP の補修方法と暴露実験.....	354
5.2.1 表面補修実験の概要.....	354
5.2.2 表面補修方法の種類.....	354
5.2.3 評価項目と暴露実験の概要.....	354
5.2.4 試験体の切出し.....	355
5.2.5 補修後の初期値試験, 観察, 測定結果.....	357
5.2.6 屋外暴露実験.....	368
5.3 劣化した GFRP 角パイプの補修実験.....	368

5.3.1 静的4点部材曲げ試験による残存性能評価.....	369
5.3.2 補修による曲げ耐荷力性能回復の試み.....	385
付属資料1： 厳しい腐食環境における GFRP 橋の採用について	397
付1.1 はじめに.....	397
付1.2 橋梁形式の選定.....	397
付1.3 設計・製作および架設.....	398
付1.3.1 主要構造.....	398
付1.3.2 設計上の課題.....	398
付1.3.3 製作および架設.....	399
付1.4 経過.....	400
付1.5 おわりに.....	401
付属資料2： 設計・製造・施工に関するデータの例	403
付2.1 歩道橋の例1	403
付2.2 歩道橋の例2	406
付2.3 水門の例.....	407